

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.004

广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析

曾家俊¹, 麦叶鹏¹, 李志威², 任秀文³, 潘健¹, 黄国如^{1,4}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 广州市水务科学研究所, 广东 广州 510220;
3. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510530;
4. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:为研究城市雨水模拟中参数对 SWMM 模拟结果的影响, 构建了广州天河智慧城 SWMM 水文模型, 开展降雨径流量水质同步监测, 对模型参数进行率定与验证, 并使用 Morris 方法分析水文水力参数和水质参数的敏感性。结果表明: 水文水力参数中最大下渗速率对总径流量敏感性最高, 地表曼宁系数对峰值流量敏感性最高, 下渗参数为影响水文水力模拟结果的主要参数; 水质参数中冲刷指数对污染物模拟结果敏感性最高, 前期干旱天数对污染物模拟结果敏感性比总径流量模拟的敏感性高。

关键词:暴雨洪水管理模型; 敏感性分析; Morris 方法; 水文水力参数; 水质参数; 天河智慧城
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0015-07

Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city // ZENG Jiajun¹, MAI Yepeng¹, LI Zhiwei², REN Xiuwen³, PAN Jian¹, HUANG Guoru^{1,4} (1. South China University of Technology, School of civil engineering and transportation, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Water Science Research Institute, Guangzhou 510220, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510530, China; 4. South China University of Technology, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to study the influence of different parameters on SWMM simulation results in urban rainwater simulation, the SWMM hydrological model of Guangzhou Tianhe Wisdom City was constructed. Simultaneous monitoring of rainfall runoff water quality and water quantity was carried out in the study area. The model parameters were determined and verified, and the sensitivity of hydrological and hydraulic parameters and water quality parameters were analyzed based on the Morris method. The results show that the maximum infiltration rate in hydrological and hydraulic parameters is the most sensitive to the total runoff volume, and the surface Manning coefficient is the most sensitive to runoff peak. The infiltration parameter is the main parameter affecting hydrological hydraulic simulation results. The exponent in water quality parameters is the most sensitive to pollutant simulation results. The sensitivity of the antecedent dry days to the simulation results of pollutants is higher than that of runoff flow simulation.

Key words: SWMM; sensitivity analysis; Morris method; hydrological and hydraulic parameters; water quality parameters; Tianhe Wisdom City

城市降雨径流引起的污染越来越受到重视^[1-2]。暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)能够较好地模拟暴雨洪水过程与非点源污染过程进行模拟^[3], 由于城市下垫面的复杂性, 很多参数需要采用参数概化得到, 因而导致参数具有一

定的不确定性, 继而影响模拟结果的准确性^[4]。尽管 SWMM 手册给出了部分参数的参考范围, 但模型参数往往反映研究区域下垫面情况的特异性, 因此, 在实际建模过程中需要在研究区域进行现场观测以率定模型参数。在模型构建过程中, 对模型参数进

基金项目: 国家自然科学基金(51739011); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202006-002); 广东省水利科技创新项目(2016-32); 广州市科技计划(201707020020, 201803030021)

作者简介: 曾家俊(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: 295440655@qq.com

通信作者: 黄国如, 教授。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

行定性与定量的敏感性分析是建模的重要内容,它能够评估不同参数对结果的影响及识别参数的重要程度,有助于提高参数识别效率和模型准确性,降低模型的不确定性^[5]。Morris 方法是目前应用较为广泛的一种敏感性分析方法,俞双恩等^[6]采用 Morris 方法对农田排水模型 DRAINMOD 参数进行敏感性分析,探讨参数对模型输出结果的影响;原文林等^[7]构建 Morris-Sobol 参数敏感性分析二层模型,定性定量分析了参数对临界雨量的影响;吴亚男等^[8]在参数率定基础上采用修正的 Morris 方法对 SWMM 的模型参数进行敏感性分析,指出了模型参数对水量水质的影响。本文结合现场监测数据,在率定验证 SWMM 参数的基础上进行敏感性分析,定性定量对比不同参数对模拟结果的影响,讨论影响模型敏感性的主要因素,旨在为 SWMM 应用于广州天河智慧城提供参考。

1 研究区域概况

广州市天河智慧城位于广州市天河区东北部,地理坐标为 113.40°E、23.13°N,地处亚热带季风气候区,多年平均降水量 1 650 mm,变化范围在 1 620~1 680 mm 之间,变差系数为 0.21;年内降雨分配不均,雨量集中在 4—9 月,约占全年降水量的 80.3%,降雨强度大,易发生洪涝灾害。该区域内地势较为平坦,北高南低,主要用地类型为商业服务业设施,建设规划用地约占总面积的 69%。作为广州市海绵城市建设示范启动区,天河智慧城是开展海绵城市建设研究的重要对象。在天河智慧城选取面积约 11.37 hm² 的汇水区域作为研究对象,在智慧城管委会办公楼楼顶安装自记雨量计,精度为 0.2 mm,采集间隔为 1 mm。在汇水区域出口检查井位置安装流量计监测流量过程,其中流速监测精度为 0.3 m/s,采集间隔 1 min,并在区域内的屋顶、绿地、道路和停车场分别采集径流样品,场降雨采集水样约 40 个,检测样品水质情况,用于模型参数的率定与验证。研究区域及监测位置如图 1 所示,其中黑线框内部为研究对象的汇水区域。

2 模型构建与参数率定

2.1 模型构建

经过走访与现场考察,收集研究区域的遥感图、地形图、用地类型分类和管网等基本资料,并在 ArcGIS 中进行数据处理,根据雨水检查井位置基于泰森多边形法划分子汇水区(图 2),得到 29 个子汇水区、29 个雨水检查井、29 条雨水管道和 1 个出水口。研究区域整体地势西北高、东南低,排水管网内

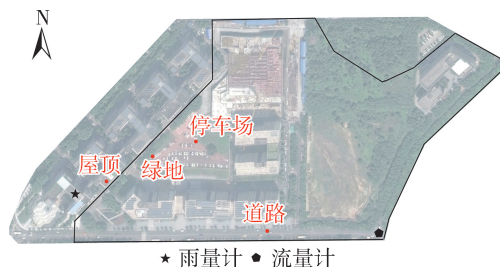


图 1 研究区域及监测位置

Fig. 1 Study area and monitoring location

的水流依靠重力自流到东南方向的出水口。根据所收集得到的基础资料设置子汇水区和排水管网特征值,如汇水区面积、坡度、不透水率,排水管网长度、管径、底高程等,将基础资料数据导入到 SWMM 中,构建研究区域城市雨洪模型。

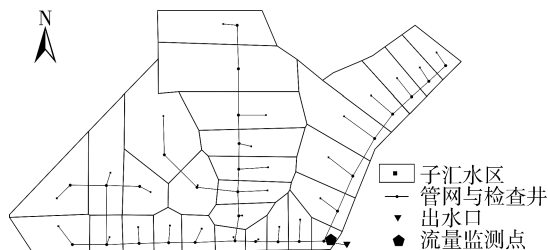


图 2 研究区域概化

Fig. 2 Summary of the study area

SWMM 包括水文水力模块和水质模块,水文水力模块将子汇水区概化为透水区域与不透水区域^[9-10],模型参数包括 N-Imperv(不透水区曼宁系数)、N-Perv(透水区曼宁系数)、Dstore-Imperv(不透水区洼蓄水深度)、Dstore-Perv(透水区洼蓄水深度)和 PctZero(不透水区无洼蓄面积率)。子汇水区中下渗模式选用 Horton 下渗模型,模型参数包括 MaxRate(最大下渗率)、MinRate(最小下渗率)、Decay Constant(渗透衰减系数)和 DryTime(前期干旱天数)。地表汇流采用动力波方法进行演算,需要设置的模型参数为 Roughness(管道曼宁系数)。

SWMM 中水质模拟模块包括污染物积累(buildup)和冲刷(washoff),模型通过这两个过程模拟子汇水区污染产生过程^[11-12]。本文污染物积累过程模拟选用饱和函数,模型参数包括 Maxbuildup(最大累积量)和 Rateconstant(半饱和累积时间);污染物冲刷过程模拟选用指数函数,模型参数包括 Coefficient(冲刷系数)和 Exponent(冲刷指数)。根据模型原理,污染物累积过程与时间有关,因此前期干旱天数影响污染物模拟结果,日期参数 Antecedent Dry Days 也是水质模拟研究的主要参数。本文选择 TSS 为污染物代表来分析模型污染物积累与冲刷参数的敏感性,下垫面包括屋顶、道路、绿地和停车场。

2.2 模型参数验证指标

根据实测数据率定参数,选用纳什效率系数、总径流量平衡误差系数和峰值流量相对误差作为水文水力模块参数率定的目标函数指标^[13],反映模拟结果与研究区域水文水力变化过程规律的关系。纳什效率系数 E_{NS} 、总径流量平衡误差系数 E_{QW} 和峰值流量相对误差 E_{PR} 计算公式分别为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,sim})^2}{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - \bar{q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$E_{QW} = \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,sim})}{\sum_{t=1}^N q_{t,obs}} \quad (2)$$

$$E_{PR} = \frac{|q_{p,obs} - q_{p,sim}|}{q_{p,obs}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $q_{t,obs}$ 、 $q_{t,sim}$ 分别为 t 时刻的实测流量和模拟流量, m^3/s ; \bar{q}_{obs} 为平均实测流量, m^3/s ; $q_{p,obs}$ 、 $q_{p,sim}$ 分别为实测峰值流量和模拟峰值流量, m^3/s ; N 为实测流量个数。

由于污染物模拟过程不确定性较强,水质参数率定以纳什系数(计算公式同式(1),将流量变为污染物质量浓度)和相关系数检验污染物过程的拟合度,相关系数 R 的表达式为

$$R = \frac{\sum (\rho_0 - \bar{\rho}_0)(\rho_c - \bar{\rho}_c)}{\sqrt{\sum (\rho_0 - \bar{\rho}_0)^2(\rho_c - \bar{\rho}_c)^2}} \quad (4)$$

式中: ρ_0 、 ρ_c 分别为采样检测的污染物质量浓度和模拟的污染物质量浓度, mg/L ; $\bar{\rho}_0$ 、 $\bar{\rho}_c$ 分别为采样检测的污染物质量浓度平均值和模拟的污染物质量浓度平均值, mg/L 。

2.3 模型率定与验证结果

2.3.1 水文水力参数

根据 SWMM 用户手册和临近地区相关研究确定参数范围^[14-16],选取 20180414、20180527、20180703 和 20180723 共 4 场次降雨进行模型水文水力参数率定,利用 2018 年 5—8 月的 10 场次实测降雨过程对模型进行验证,实测与模拟结果对比见图 3 和表 1,得到的水文水力参数见表 2。

从图 3 和表 1 可以看出,率定期实测值和模拟过程较为吻合,率定期和验证期模拟值与实测值之间的纳什系数 E_{NS} 为 0.63 ~ 0.97,总径流量平衡误差系数 E_{QW} 绝对值均小于 0.30,峰值流量相对误差 E_{PR} 均小于 20%,说明所构建的 SWMM 模拟精度较高,该模型在天河智慧城具有较好的适用性。

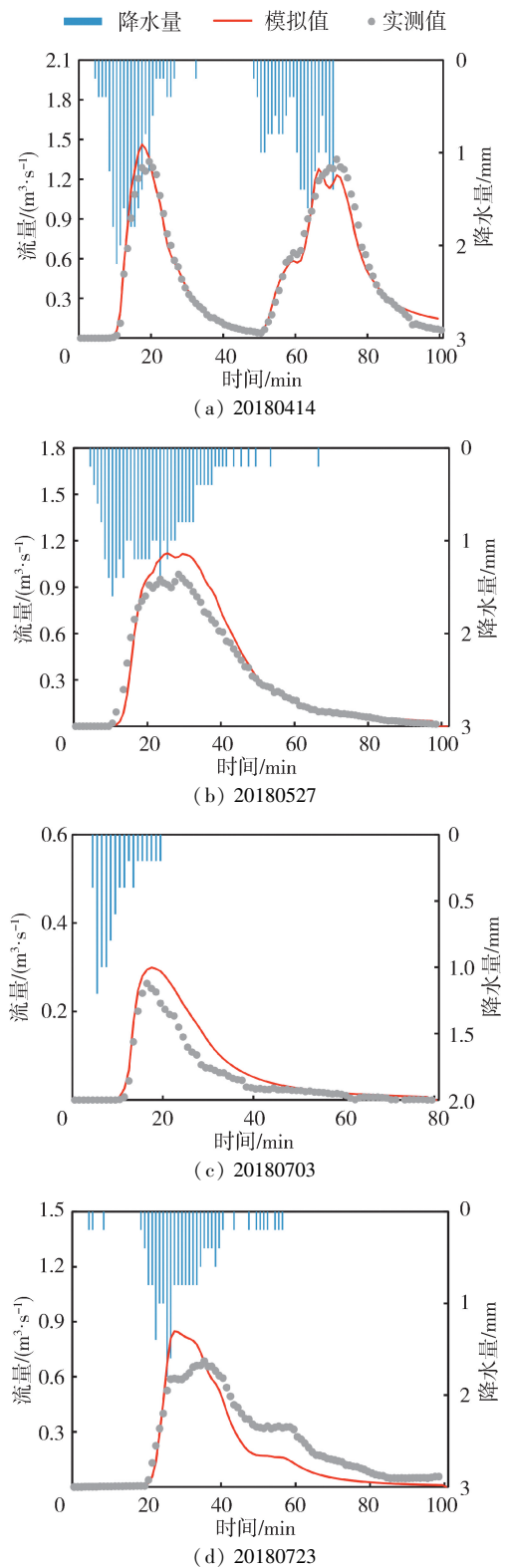


图 3 率定期实测与模拟结果

Fig. 3 Results of periodic field measurement and simulation

2.3.2 水质参数

将 TSS 作为主要污染物研究对象,下垫面分别为屋顶、道路、绿地和停车场,利用 20180723 场次降雨率定模型参数,采用 20180507 和 20180703 两场降雨验证模型,水质参数率定与验证结果见表 3,得到的水质参数见表 4。

表1 水文水力参数率定与验证结果

Table 1 Results of calibration and verification of hydrologic and hydraulic parameters

类别	降雨场次	E_{NS}	E_{QW}	$E_{PR}/\%$
率定期	20180414	0.904	0.02	8.24
	20180527	0.968	0.12	13.88
	20180703	0.856	0.12	6.51
	20180723	0.723	-0.27	19.55
验证期	20180507	0.905	0.07	11.92
	20180530	0.930	-0.05	9.27
	20180622	0.872	-0.10	10.06
	20180623	0.766	-0.14	6.88
	20180625	0.795	-0.12	3.45
	20180707	0.795	0.27	13.65
	20180713	0.785	0.07	3.73
	20180724	0.876	0.20	12.06
	20180828	0.825	-0.28	5.07
	20180831	0.634	-0.29	0.62

表2 水文水力参数取值

Table 2 Value of hydrological and hydraulic parameters

类别	N-Imperv	N-Perv	Dstore-Imperv/mm	Dstore-Perv/mm	PctZero/%
文献[16-19]推荐范围	0.011 ~ 0.024	0.05 ~ 0.8	1.27 ~ 2.54	2.54 ~ 7.62	0 ~ 100
模型取值	0.013	0.6	2.1	6.51	30
类别	maxRate/(mm·h ⁻¹)	minRate/(mm·h ⁻¹)	decay Constant/h	Dry Time/d	Roughness
文献[16-19]推荐范围	25.4 ~ 127	0.5 ~ 10	2 ~ 7	5 ~ 15	0.011 ~ 0.020
模型取值	115.51	1.725	6.1	10	0.015

表3 水质参数率定与验证结果

Table 3 Results of calibration and validation of water quality parameters

类别	降雨场次	下垫面	E_{NS}	R
率定期	20180723	屋顶	0.608	0.877
		道路	0.536	0.590
		绿地	0.801	0.975
		停车场	0.544	0.821
验证期	20180507	屋顶	0.641	0.604
		道路	0.553	0.782
		绿地	0.545	0.893
		停车场	0.626	0.805
验证期	20180703	屋顶	0.566	0.920
		道路	0.551	0.978
		绿地	0.545	0.531
		停车场	0.517	0.544

表4 前期干旱 10 d 的模型水质参数取值

Table 4 Water quality parameters of the model with 10 days of Antecedent Dry Days

下垫面	最大累积量/(kg·hm ⁻²)	半饱和累计时间/d	冲刷系数	冲刷指数
屋顶	150	3	0.006	1.20
道路	200	1	0.003	1.30
绿地	200	4	0.007	1.35
停车场	150	2	0.005	1.25

从表3可知,模拟与实测数据之间的纳什效率系数与相关系数均大于0.5,说明所构建的SWMM拟合情况较好,适用于天河智慧城水质模拟研究。

3 参数敏感性分析

3.1 分析方法

参数敏感性分析观察参数变化对模拟结果的影响程度,在参数识别与选取中有重要作用,有助于提高估算参数的准确性^[17-19]。Morris 筛选法具有易于理解、操作简单的优点,被广泛应用。选取模型参数中某一变量 x_i ,其余参数值固定不变,在所选参数阈值范围内随机改变 x_i ,运行模型得到模拟结果的值,用变化率 e_i 判断参数变化对输出值的影响程度,计算公式为

$$e_i = (y_i - y) / \Delta_i \quad (5)$$

式中: y_i 为参数变化后的输出值; y 为参数变化前的输出值; Δ_i 为第 i 个参数的变幅。

修正的 Morris 筛选法将单一变量以固定步长百分率变化,运行模型得到不同扰动下的结果,然后计算摩尔斯系数并取平均值,求得敏感性判别因子 S :

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i) / Y_0}{(P_{i+1} - P_i) / 100} \quad (6)$$

式中: Y_i 、 Y_{i+1} 分别为模型第 i 次和第 $i+1$ 次运行输出结果; Y_0 为参数调整后计算结果初始值; P_i 、 P_{i+1} 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次模型运算参数值相对于校准后初始参数值的变化百分率; n 为模型运行次数。

根据相关研究^[20-21],依据参数的 S 值将参数的敏感性划分为4个等级:当 $|S| \geq 1$ 时,为高敏感参数;当 $0.2 \leq |S| < 1$ 时,为敏感参数;当 $0.05 \leq |S| < 0.2$ 时,为中等敏感参数;当 $0 \leq |S| < 0.05$,为不敏感参数。

3.2 分析结果

以率定得到的水文水力参数作为初始值,根据 Morris 方法^[8,22]使逐个参数分别取 10%、20%、30%、-10%、-20% 和 -30% 变幅进行扰动,并根据模拟结果计算敏感性因子,模拟得到的水文水力参数对总径流量和峰值流量的敏感性如表5所示。

从表5可知,水文水力模块参数中,MaxRate 参数对总径流量最为敏感,且 MaxRate 越大,总径流量越小;N-Imperv 参数对峰值流量最为敏感,且 N-Imperv 越大,峰值流量越小。下渗模式中的参数对总径流量结果的敏感性比曼宁系数与洼地蓄水参数的大,而下渗模式中的参数对峰值流量的敏感性比曼宁系数与洼地蓄水参数的小。由水文过程可知,下渗量越大,径流越小,下渗参数对径流量影响最大;曼宁系数影响着汇流速率,曼宁系数越小,汇

表5 水文水力参数敏感性分析结果

Table 5 Results of sensitivity analysis of hydrological and hydraulic parameters

参数	总径流量		峰值流量	
	敏感因子	敏感性	敏感因子	敏感性
N-Imperv	-0.01	不敏感	-0.06	中等敏感
N-Perv	-0.05	中等敏感	0.00	不敏感
Dstore-Imperv	-0.04	不敏感	-0.01	不敏感
Dstore-Perv	-0.08	中等敏感	-0.01	不敏感
PctZero	0.02	不敏感	0.01	不敏感
MaxRate	-0.21	敏感	-0.03	不敏感
MinRate	-0.01	不敏感	0.00	不敏感
Decay Constant	0.18	中等敏感	0.02	不敏感
DryTime	0.00	不敏感	0.00	不敏感
Roughness	-0.01	不敏感	-0.04	不敏感

流越快,径流峰值越大。因此,在模型参数调整时,可优先考虑调整下渗参数,使模拟的径流总量相近,再调整曼宁系数与洼地蓄水参数,使径流峰值与实测数据吻合。敏感因子为负时,表示该参数越大,总径流量或峰值流量越小。10个水文水力参数中,有7个参数呈现出参数越大、总径流量越小的关系,5个参数呈现出参数越大、峰值流量越小的关系。下渗参数中 DryTime 参数对总径流量与峰值流量的影响均为不敏感,说明 SWMM 中干旱天数对径流模拟结果造成的影响不大,侧面说明了在 SWMM 中土壤在降雨前的初始含水量对径流模拟结果影响不大。

以率定得到的水质参数作为初始值,根据 Morris 方法使逐个参数分别取 10%、20%、30%、-10%、-20% 和 -30% 变幅进行扰动,模拟得到水质参数对污染负荷和污染物浓度峰值的敏感性结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出,水质参数对水质模拟结果较为敏感,且不同下垫面的累积与冲刷参数对模拟结果的影响均相似,其中累积部分的 Max Buildup 参数对污染负荷与浓度峰值均呈现出高敏感性;冲刷部分的 Exponent 参数除了停车场以外对污染负荷与浓度峰值均呈现出高敏感性,且 Exponent 参数对水质模拟结果的敏感性最大。因为模型模拟冲刷模式为指数函数,因此冲刷指数的变化对结果影响更大。Rate Constant 参数均呈现出参数越大负荷与浓度峰值越小的关系,Antecedent Dry Days 参数对模拟结果影响在中等敏感及以上,Antecedent Dry Days 越大对污染物负荷与浓度峰值的影响越大。

4 结论

a. 在研究区域开展降雨径流量水质同步监测,将所得数据应用于 SWMM 的模型参数率定和验证,所构建的 SWMM 模拟精度较高,该模型在天河

表6 水质参数敏感性分析结果

Table 6 Results of sensitivity analysis of water quality parameters

下垫面	参数	污染负荷		浓度峰值	
		敏感度	敏感性	敏感度	敏感性
屋顶	Max Buildup	1.000	高敏感	1.500	高敏感
	Rate Constant	-0.232	敏感	-0.356	敏感
	Coefficient	0.696	敏感	0.968	敏感
	Exponent	1.406	高敏感	6.738	高敏感
道路	Antecedent Dry Days	0.479	敏感	0.394	敏感
	Max Buildup	0.993	敏感	1.500	高敏感
	Rate Constant	-0.182	中等敏感	-0.138	中等敏感
	Coefficient	0.713	敏感	0.970	敏感
绿地	Exponent	1.756	高敏感	8.965	高敏感
	Antecedent Dry Days	0.191	中等敏感	0.161	中等敏感
	Max Buildup	1.000	高敏感	1.480	高敏感
	Rate Constant	-0.574	敏感	-0.444	敏感
停车场	Coefficient	0.550	敏感	0.871	敏感
	Exponent	1.340	高敏感	4.980	高敏感
	Antecedent Dry Days	0.702	敏感	0.569	敏感
	Max Buildup	1.000	高敏感	1.500	高敏感
下垫面	Rate Constant	-0.459	敏感	-0.102	中等敏感
	Coefficient	0.180	中等敏感	0.523	敏感
	Exponent	0.931	敏感	3.170	高敏感
	Antecedent Dry Days	0.348	敏感	0.289	敏感

智慧城具有较好的适用性。

b. 水文水力参数中 MaxRate 对总径流量敏感性最高,Decay Constant 次之,N-Imperv 对峰值流量敏感性最高,Roughness 次之;水文水力参数中下渗模式参数对总径流量敏感性更高,透水区参数比不透水区参数对总径流量敏感性更高,不透水区曼宁系数与管道曼宁系数对峰值流量敏感性更高。

c. 水质参数对水质模拟结果较为敏感,不同下垫面的累积与冲刷参数对模拟结果的影响均相似,水质参数中 Exponent 对污染负荷与浓度峰值的敏感性均最高,Max Buildup 次之。前期干旱天数在 SWMM 的水文与水质模拟中均有考虑,但其对水量模拟结果影响不大,而在水质模拟中属于敏感参数。

参考文献:

- [1] 黄国如. 城市暴雨内涝防控与海绵城市建设辨析[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 28(2): 8-14. (HUANG Guoru. Discrimination of relationship between urban storm waterlogging prevention and sponge city construction[J]. China Flood & Drought Management, 2017, 28(2): 8-14. (in Chinese))
- [2] 崔广柏,张其成,湛忠宇,等. 海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 1-4. (CUI Guangbo, ZHANG Qicheng, ZHAN Zhongyu, et. al. Research progress and discussion of sponge city

- construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (2):1-4. (in Chinese))
- [3] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015,35 (4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et. al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (4) :1-5. (in Chinese))
- [4] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. 水科学进展,2009,20 (1) :45-51. (ZHAO Dongquan, WANG Haozhen, CHEN Jining, et. al. Parameters uncertainty analysis of urban rainfall-runoff simulation[J]. Advances in Water Science, 2009, 20 (1) : 45-51. (in Chinese))
- [5] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. 水利水电科技进展,2015,35 (6) :105-112. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review of methods of parameter sensitivity analysis in hydrologic modeling[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (6) :105-112. (in Chinese))
- [6] 俞双恩,王宁,于智恒,等. DRAINMOD-S 模型参数的全局灵敏度分析[J]. 水科学进展,2015,26 (2) :271-278. (YU Shuang'en, WANG Ning, YU Zhiheng, et al. Global sensitivity analysis of parameters in DRAINMOD-S [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (2) :271-278. (in Chinese))
- [7] 原文林,高倩雨,张晓蕾,等. 基于 Morris-Sobol 的临界雨量参数敏感性分析[J]. 人民黄河,2018,40 (7) :33-37. (YUAN Wenlin, GAO Qianyu, ZHANG Xiaolei, et al. Sensitivity analysis of parameters in rainfall threshold calculation based on Morris-Sobol model [J]. Yellow River, 2018, 40 (7) :33-37. (in Chinese))
- [8] 吴亚男,熊家晴,任心欣,等. 深圳鹅颈水流域 SWMM 模型参数敏感性分析及率定研究[J]. 给水排水,2015, 41 (11) :126-131. (WU Yanan, XIONG Jiaqing, REN Xinxin, et al. Sensitivity analysis and calibration study on the parameters of SWMM for Ejing watershed in Shenzhen [J]. Water and Wastewater Engineering, 2015 (11) :126-131. (in Chinese))
- [9] 王蓉,秦华鹏,赵智杰. 基于 SWMM 模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2015,51 (1) :141-150. (WANG Rong, QIN Huapeng, ZHAO Zhijie, Control studies of peak flow and non-point source pollution for urbanized area based on SWMM [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51 (1) :141-150. (in Chinese))
- [10] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展,2019, 39 (6) :56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (6) :56-61. (in Chinese))
- [11] 马萌华,李家科,邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报,2017,36 (11) :62-72. (MA Menghua, LI Jiake, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (11) :62-72. (in Chinese))
- [12] 吴海春,胡爱兵,任心欣. 基于 SWMM 模型的 LID 措施年 SS 总量去除率计算[J]. 水资源保护,2018,34 (5) :9-12. (WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin. Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (5) :9-12. (in Chinese))
- [13] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水力发电学报,2018,37 (3) :59-68. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Sensitivity analysis on SWMM model parameters based on Sobol method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (3) :59-68. (in Chinese))
- [14] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护,2017,33 (2) :31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et. al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2) :31-36. (in Chinese))
- [15] 黄国如,曾家俊,吴海春,等. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应[J]. 水资源保护,2018,34 (1) :8-15. (HUANG Guoru, ZENG Jiajun, WU Haichun, et al. First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1) :8-15. (in Chinese))
- [16] 吴海春,黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32 (5) :11-16. (WU Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (5) :11-16. (in Chinese))
- [17] 黄国如,王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护,2017,33 (2) :5-9. (HUANG Guoru, WANG Xin, Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2) :5-9. (in Chinese))
- [18] 栾慕,袁文秀,刘俊,等. 基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32 (2) :57-61. (LUAN Mu, YUAN Wenxiu, LIU Jun, et al. Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based

on SWMM-MIKE11 coupled model[J]. Water Resources Protection,2016,32(2):57-61. (in Chinese))

[19] 张海阔,姜翠玲,李亮,等. 基于 HYDRUS-1D 模拟的变水头入渗条件下 VG 模型参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):32-40. (ZHANG Haikuo, JIANG Cuiling, LI Liang, et al. Parameter sensitivity analysis of VG model in the varying-head infiltration based on HYDRUS-1D simulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(1):32-40. (in Chinese))

[20] 宋奔奔,高成,寇传和,等. 基于 SWMM 的生物滞留池布置水文时空效应[J]. 水资源保护,2017,33(3):25-30. (SONG Benben, GAO Cheng, KOU Chuanhe, et al. Spatial and temporal hydrological responses of arrangement of bioretention cell based on SWMM[J]. Water Resources

Protection,2017,33(3):25-30. (in Chinese))

[21] 李丹,张翔,张扬,等. 水文模型参数敏感性的区间分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(1):29-32. (LI Dan, ZHANG Xiang, ZHANG Yang, et al. Application of interval analysis of sensitivity of parameters of hydrologic model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources. 2011,31(1):29-32. (in Chinese))

[22] 高颖会,沙晓军,徐向阳,等. 基于 Morris 的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):87-90. (GAO Yinghui, SHA Xiaojun, XU Xiangyang, et al. Sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Morris method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2016,27(3):87-90. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-23 编辑:彭桃英)

(上接第 14 页)

生目标,体现厕所革命的深入开展需求;农村生活污水处理和综合利用率,体现了城市与农村污水处理的差异,明确指出农村污水处理应走回田之路。农村生活垃圾处理目标则与城市生活垃圾处理目标相同,共同抓无害化处理率,差异体现在农村与城市条件不同。把农村卫生厕所与生活污水处理综合利用相结合,能真正体现农村特色。农村生活污水中主要污染物来源是厕所的黑水和黄水,因此抓农村厕所卫生化就是源头控制;抓农村生活污水处理综合利用,就是利用污水中的氮和磷来提升土壤质量。这两个指标端正了农村污水从源头到排放的控制理念。厕所革命必须以人性化、无害化、资源化为目标,如果厕所污水不与污水处理厂正确相接,就没有卫生,更没有综合利用,更重要的是没有体现厕所革命的含义,这两个指标回答了厕所革命应该给农村、农民、农业带来什么变化的问题。城市、农村相同的生活垃圾处理率指标,在运行条件不同的农村和城市会产生不同的推进模式。城市生活垃圾运输和处理都有运行费,农村则缺少运行费,但变废为宝的理念在农村比城市更容易实现。就地收集、就地处理、就地变废为宝的技术更适合农村生活垃圾无害化处理,农村垃圾处理率能够维持的关键就在于节约运行费。厕所革命、沼气化,只要和废水处理综合利用、垃圾无害化处理相结合,就能实现可持续。这 3 个农村指标,表现出懂农业,爱农村,爱农民,改变了当前农村污水、垃圾处理与城市无差异的技术路线,但目前亟须颁布与这 3 个指标理念相同的配套污水排放标准,体现不是盲目提高污水排放指标限

值,而是追求提高污水综合利用率和垃圾无害化处理率。

4 生态憾点

面向 2035 年生态环境根本好转的新目标,需要对根本好转进行指标界定。目前仅有森林覆盖率、湿地保护率、水土保持率、自然保护地面积占陆域国土面积比例、重点生物物种种数保护率 5 个指标,覆盖面侧重生态领域,缺乏整体导向性。建议在对温度、湿度、大气压、逆温层数据系统分析的基础上增加雾霾事件控制率和 PM1 指标;增加生态流量保证率和更直接反映流域生态调控能力的指标,如地下水污染区减少率,近岸海域海水水质规定标准达标率等;建议舍弃自然保护地面积占陆域国土面积比例指标,因为此指标量化有难度,区域间也不可比,区域开发程度的差异性和特殊保护对象的必要性,决定了自然保护地面积指标的高低,这可以强制执行,但不宜列为美丽中国建设评价指标。指标体系中唯一有全国量化达标要求的是水环境指标,应留有余地,建议将水环境目标改为 III 类水质达标率达 90% 以上,较现状提高 15%,辅以重要功能区消灭劣 V 类水,这更具操作性。

《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》在评价机制方面的创新,是突出亮点,把中国科学院的评价结果公之于世,给广大公众参与美丽中国建设的机会,依托创新点完善憾点,一定能制定出更加完善、美丽的指标体系和实施方案。

(收稿日期:2020-03-19 编辑:彭桃英)